تأثیر نرخ سرمایش و مقدار مس بر ریزساختار آلیاژ Zn–27%Al تحت ریخته‌گری تبریدی*

رحیم اعرابی جشوقانی(۱)   حمید پیرنجم‌الدین(۲)   حسن قهوه‌چیان(۳)   حمیدرضا شاهوردی(٤)

چکیده

در این پژوهش تأثیر نرخ سرمایش و مقدار مس بر ریزساختار آلیاژ Zn–27%Al با استفاده از ریخته‌گری تبریدی در قالب ماسه‌ای بررسی شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که با کاهش نرخ سرمایش، فاصله بازوهای دندریتی و درصد فازهای بین دندریتی افزایش یافت. همچنین افزودن مس به میزان ۱ درصد وزنی تغییر قابل توجهی در ساختار ایجاد نکرد در حالیکه افزودن مقادیر ۲ و ٤ درصد وزنی منجر به تشکیل رسوب ε-$CuZn_4$ در نواحی بین دندریتی شد. علاوه براین با کاهش نرخ سرمایش، مورفولوژی رسوبات ε از حالت نیمه ورقه‌ای به کروی شکل تغییر کرد.

واژه‌های کلیدی ریخته‌گری تبریدی، آلیاژ ZA27، ریزساختار، نرخ سرمایش.

Influence of Cooling Rate and Copper Content on the Microstructure of Zn–27%Al Alloy under End-chill Casting

R. Arabi Jeshvaghani   H. Pirnajmoddin   H. Ghahvechian   H.R. Shahverdi

Abstract

In this research, the effect of cooling rate and copper content on the microstructure of Zn–27%Al alloy was investigated using chilled casting in a sand mould. Microstructural examination showed that with decreasing cooling rate, dendrite arm spacing and the percentage of interdendritic phases increased. Moreover, addition of copper up to 1 wt. % did not lead to significant change in microstructure, while addition of 2, and 4 wt% copper led to the formation of □-$CuZn_4$ phase in the interdendritic regions. In addition, with decreasing cooling rate, the morphology of □ precipitates varied from semi-plate-like to spherical.

Key words End-Chill Casting, ZA27 Alloy, Microstructure, Cooling rate.

چهار گوش در چکیده انگلیسی که به رنگ قرمز مشخص گردیده است بررسی و اصلاح شده را در فایل جداگانه ارسال فرمایید

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۳/۳/۱۰ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است. نویسنده مسئول مشخص گردد

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس.

(۲) کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس.

(۳) کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس.

(٤) دانشیار، عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس.

DOI: **10.22067/ma.v28i2.35765**

مقدمه

آلیاژهای روی- آلومینیم به دلیل استحکام ویژه بالا، خواص سایشی عالی و قیمت کمتر در مقایسه با سایر فلزات غیرآهنی بطور گسترده در کاربردهای سایشی در ماشین‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بین آلیاژهای پایه روی آلیاژ ZA27 با داشتن کمترین دانسیته دارای بیشترین استحکام است. این آلیاژ دارای مشخصات فیزیکی، مکانیکی و تکنولوژیکی مناسبی است که از جمله آنها می‌توان به دمای ذوب پایین، قابلیت ریخته‌گری خوب، ماشینکاری آسان و مقاومت به خوردگی بالا اشاره کرد [۱، ۲]. با وجود مزایای ذکر شده، استحکام و سختی آلیاژهای دوتایی روی- آلومینیم برای استفاده در بسیاری از کاربردهای مهندسی قابل قبول نیست.

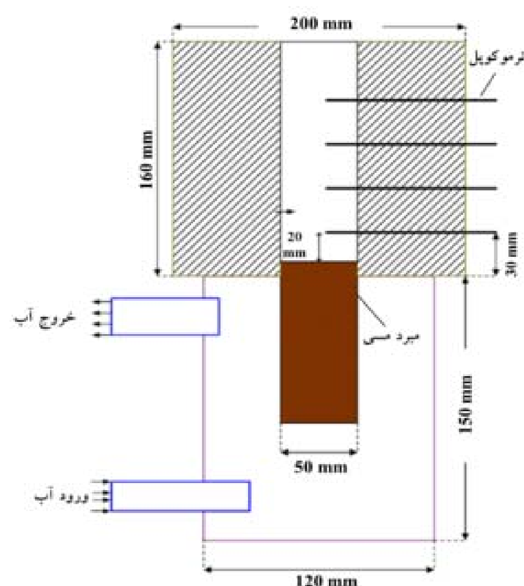
تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد افزودن عناصر آلیاژی مانند سیلیسیوم، مس، منیزیم و نیکل باعث بهبود خواص مکانیکی و سایشی این آلیاژها خواهد شد [۳-۵]. مس یکی از مؤثرترین عناصر آلیاژی در بهبود خواص مکانیکی و سایشی آلیاژهای روی- آلومینیم است. نتایج نشان می‌دهد افزودن ۱ الی ۳ درصد مس به این آلیاژها باعث بهبود خواص مکانیکی، مقاومت خزشی و رفتار خوردگی می‌شود [٦]. یکی دیگر از عوامل تأثیر گذار در بهبود خواص مکانیکی و سایشی این آلیاژها ریزساختار است. مؤثرترین پارامتر در تعیین ریزساختار آلیاژ ریخته شده کنترل نرخ سرمایش می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد افزایش نرخ سرد شدن با کاهش فاصله‌ی بازوهای دندریتی باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود. علاوه براین نرخ سرمایش بر میزان تخلخل و نوع و مقدار فازها تشکیل شده نیز تأثیرگذار است [۷، ۸].

تاکنون تحقیقات زیادی با بکارگیری روش‌های مختلف ریخته‌گری برای ایجاد ریزساختارهای متفاوت انجام شده است. اما در بیشتر موارد تنها یکی از پارامترهای مؤثر (مانند نرخ سرد شدن، عنصر آلیاژی و ...) مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۱]. در این پژوهش آلیاژ دوتایی Zn-27%Al و آلیاژهای سه تایی Zn-27%Al-xCu (x=1, 2, 4) تحت ریخته‌گری تبریدی در قالب ماسه‌ای تولید شده است. هدف این تحقیق بررسی اثر نرخ سرمایش و میزان مس افزوده شده بر ریزساختار آلیاژها و فازهای تشکیل شده می‌باشد. همچنین تأثیر نرخ سرمایش بر اندازه، مرفولوژی و درصد فازهای غنی از مس نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تحقیق

در این پژوهش برای آلیاژسازی از شمش آلومینیوم (۹۹/۹٦٪)، روی (۹۹/۹٦٪) و آمیژان (۷۵٪ مس همراه با یک ماده گدازنده)، با نام تجاری ALTAB استفاده شد. آلیاژسازی در یک کوره مقاومتی در دمای ٦۰۰ درجه سانتیگراد و تحت دمش گاز آرگون انجام شد. پس از آلیاژ سازی، ذوب ریزی (دمای بار ریزی ۵۵۰ درجه سانتیگراد) در یک قالب ماسه‌ای که در کف آن مبرد مسی مجهز به سیستم آبگرد تعبیه شده بود، صورت گرفت. قالب از ماسه سیلیسی شسته که با ٤٪ چسب سیلیکات سدیم مخلوط شده بود، تهیه و به مدت ۸-۷ دقیقه گاز دی اکسید کربن در آن دمیده شد. قبل از فرآیند ذوب ریزی برای کاهش میزان رطوبت، قالب‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای ۱٤۰ درجه سانتیگراد خشک شدند. به منظور ثبت دما حین انجماد ٤ عدد ترموکوپل نوع k در فواصل مختلف نسبت به مبرد تعبیه شدند. در شکل (۱) قالب طراحی شده برای فرآیند ذوب ریزی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

نمونه‌ی حاصل از فرآیند ریخته‌گری استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱٦۰ میلی‌متر بوده که به دلیل انقباض انجمادی در قسمت بالای نمونه تنها ۱۱۰ میلی‌متر ابتدایی آن برای نمونه سازی استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژها با استفاده از روش جذب اتمی اندازه‌گیری شد. در جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژها داده شده است.



شکل ۱ قالب طراحی شده برای ریخته‌گری تحت تبرید

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژهای ریخته شده با مقادیر مختلف مس

آلیاژ	عنصر آلیاژی				
	Zn	Mg	Fe	Cu	Al
آلیاژ بدون مس	باقیمانده	۰/۰۱	۰/۱	–	۲۵/۵
آلیاژ حاوی ٪۱	باقیمانده	۰/۰۲	۰/۱	۱/۱	۲٦/۲
آلیاژ حاوی ٪۲	باقیمانده	۰/۰۱	۰/۱	۲/۲	۲٦/۹
آلیاژ حاوی ٪٤	باقیمانده	۰/۰۱	۰/۱	٤/۲	۲۷/٦

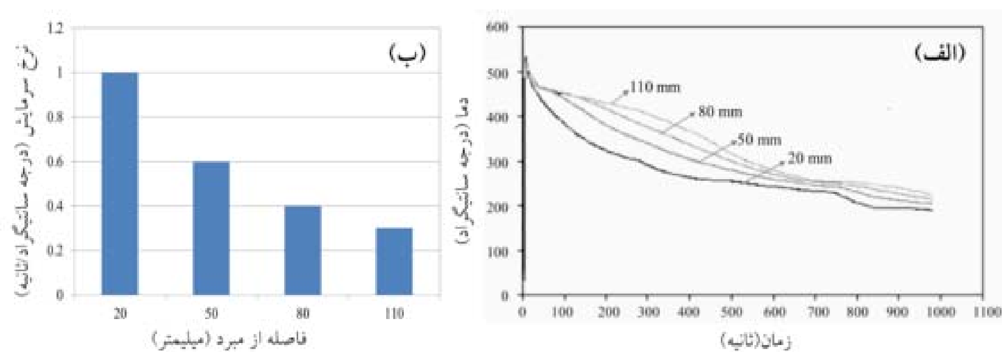
برای مطالعه تأثیر نرخ سرد شدن بر ریزساختار آلیاژهای ریخته شده، نمونه‌ها در فواصل معین از مبرد برش داده شده و پس از آماده سازی سطحی توسط محلول اچ متشکل از ۵ گرم CrO_3 و ۰/۵ گرم Na_2SO_4 در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حکاکی و با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آشکارساز پرتو ایکس بررسی شدند. برای اندازه‌گیری درصد فازها و میانگین اندازه بازوهای دندریتی اولیه و ثانویه از نرم افزار آنالیز تصویر Aquinto استفاده شد. برای اندازه‌گیری بازوهای دندریتی اولیه از شیوه مثلث استفاده شد. در این روش مرکز سه دندریت همسایه به یکدیگر وصل شده و اضلاع آن به عنوان بازوهای دندریتی در نظر گرفته می‌شود. در مورد بازوهای دندریتی ثانویه نیز فاصله بین شاخه‌های کناری یک بازوی دندریتی اولیه اندازه‌گیری شده است [۱۲]. در رابطه با اندازه‌گیری درصد فاز، با توجه به تمایز روشنایی فازهای مختلف و محاسبه سطح مربوط به هر فاز توسط نرم افزار درصد آن فاز تعیین شد. لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده برای اندازه بازوهای دندریتی اولیه و ثانویه بترتیب میانگین ۳۰ و ۱۵ بار اندازه گیری در نقاط مختلف هر نمونه است. همچنین مقدار درصد فاز گزارش شده از میانگین ۵ بار اندازه گیری در قسمت‌های مختلف نمونه بدست آمده است.

نتایج و بحث

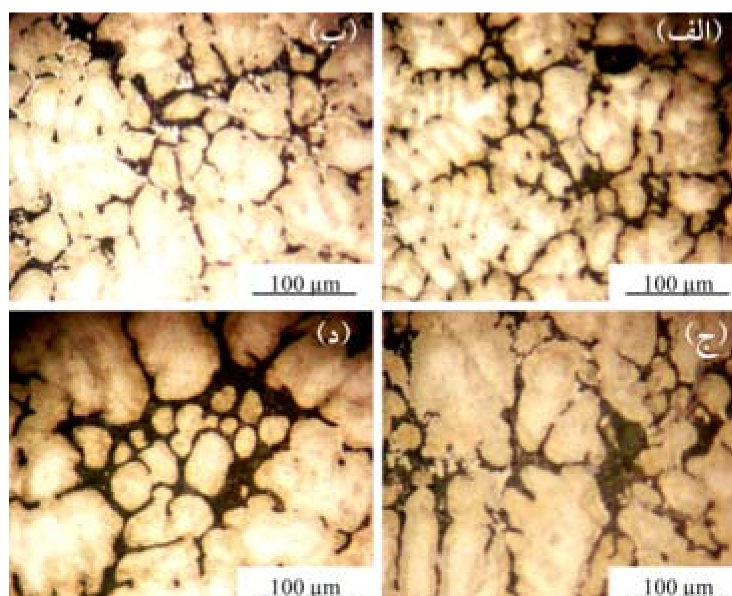
تأثیر نرخ سرمایش بر ریزساختار

در شکل (۲- الف) منحنی‌های سرمایش در فواصل مختلف از مبرد نشان داده شده است که بیانگر وجود سه ناحیه‌ی متفاوت در حین سرد شدن است. مرحله‌ی اول سرمایش تا دمای ذوب تعادلی (٤۹۲ درجه سانتی‌گراد)، مرحله دوم انجماد خمیری تا دمای سالیدوس (۳۸۰ درجه سانتی‌گراد) و مرحله سوم سرد شدن در حالت جامد تا رسیدن به دمای اتاق می‌باشد. در شکل (۲-ب) نیز متوسط مقادیر نرخ سرمایش در فواصل مختلف از مبرد مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود استفاده از مبرد باعث ایجاد نرخ‌های سرمایش مختلف در نقاط متفاوت نمونه ریختگی شده است.

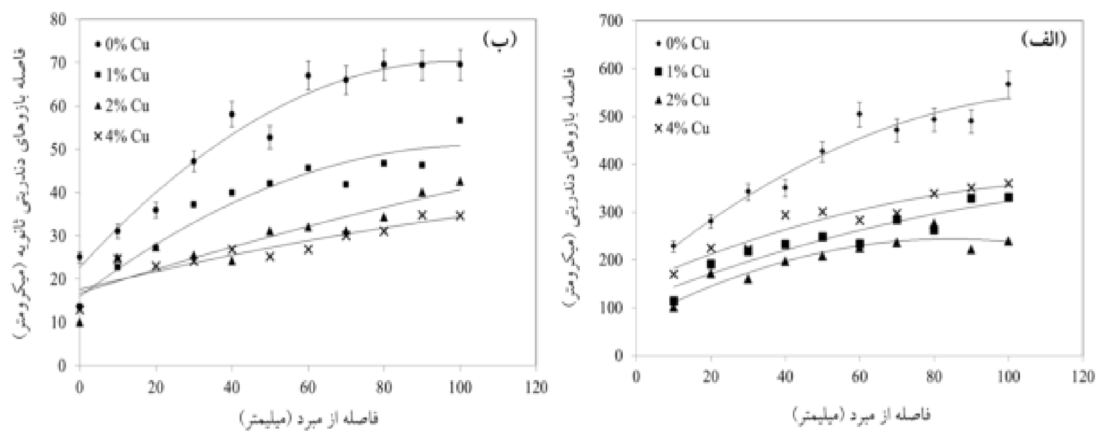
در شکل (۳) ریزساختار آلیاژ حاوی ۲ درصد وزنی مس در فواصل مختلف از مبرد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از مبرد به دلیل کاهش نرخ سرمایش فاصله‌ی بازوهای دندریتی و درصد فازهای بین دندریتی در ساختار افزایش یافته است.



شکل ۲ الف) منحنی‌های سرمایش؛ ب) متوسط نرخ سرمایش در فواصل مختلف از مبرد



شکل ۳ ریزساختار آلیاژ حاوی ۲ درصد وزنی مس در فواصل مختلف از مبرد: الف) ۲۰؛ ب) ۵۰؛ ج) ۹۰؛ د) ۱۱۰ میلی‌متری



شکل ٤ میانگین فاصله بازوهای دندریتی: الف) اولیه؛ ب) ثانویه در فواصل مختلف از مبرد

نکته قابل توجه دیگر در این شکل وجود ساختار دندریتی هم محور در نقاط مختلف نمونه با نرخ‌های سرمایش متفاوت می‌باشد. بطور کلی گرادیان حرارتی (G) و سرعت جبهه انجماد (R) پارامترهای اصلی فرآیند انجماد برای تعیین شکل و اندازه ریزساختار هستند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد در آلیاژ Zn–27%Al رشد ستونی در نرخ‌های سرمایش بیش از ۱ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه محتمل است و در مقادیر کمتر رشد به صورت هم‌محور رخ می‌دهد [۱۳]. نتایج نشان داده شده در شکل (۲–ب) و تصاویر متالوگرافی در شکل (۳) در توافق با این حقیقت است.

برای بررسی کمی تغییرات ریزساختار با نرخ سرمایش، فاصله بازوی دندریتی اولیه و ثانویه در فواصل مختلف از مبرد اندازه‌گیری شده است. در شکل (٤) مقادیر به دست آمده برای فواصل بازوهای دندریتی اولیه و ثانویه برای آلیاژهای مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با دور شدن از مبرد و کاهش نرخ سرمایش فاصله بازوهای دندریتی افزایش یافته است. نتایج بدست آمده در توافق با کارهای انجام شده توسط محققان دیگر است [١٤، ١٥]. به‌طور کلی نحوه تغییر اندازه بازوهای دندریتی ثانویه با نرخ سرمایش بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$SDAS = K\,(R_{AC})^{-c} \qquad (۱)$$

در این رابطه SDAS اندازه بازوهای دندریتی ثانویه، R متوسط نرخ سرمایش، K ثابت و مقدار c نیز بسته به نحوه محاسبه سرعت سرمایش بین ۰/۳ تا ۰/۵ متغیر است [١٦].

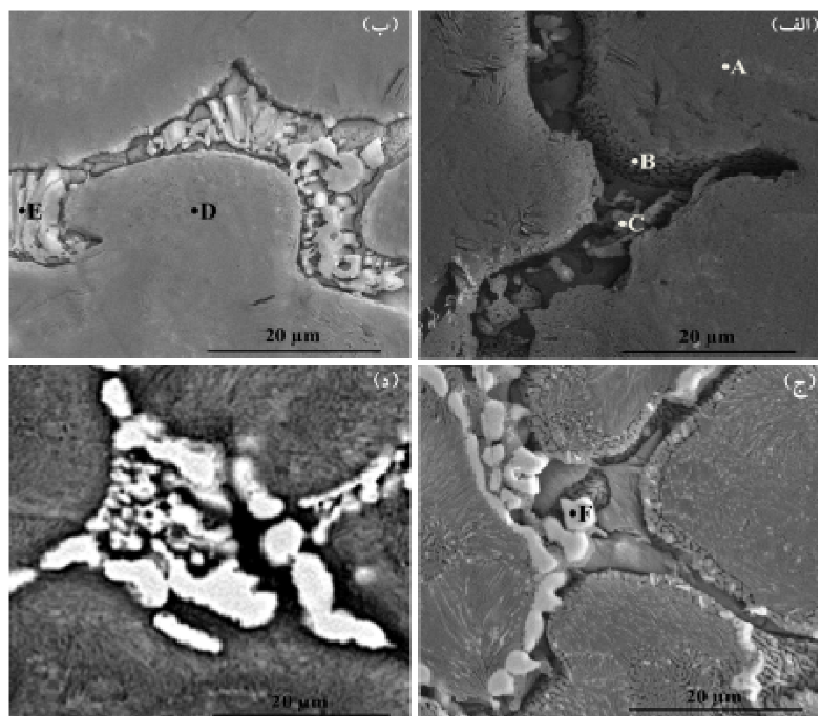
تأثیر درصد مس افزوده بر ریزساختار و فازهای تشکیل شده

در شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژهای مختلف در فاصله ۲۰ میلی‌متری از مبرد نشان داده شده است. مطابق دیاگرام فازی دوتایی آلومینیم- روی [۱۷] (شکل ٦) در حین سرمایش آلیاژ ZA27 اولین فاز تشکیل شده دندریت‌های فاز α غنی از آلومینیم است. آنالیز کمی این فاز (نقطه A در شکل ۵- الف) نشان دهنده حضور تنها دو عنصر آلومینیم و روی است که درصد بالای آلومینیم تصدیق کننده حضور فاز α است (شکل ۷- الف). در ادامه سرمایش فاز α طی یک استحاله پریتکتیکی توسط فاز β غنی از روی احاطه می‌شود. به دلیل عدم وقوع دگرگونی پریتکتیکی بطور کامل، ریزساختار حاصله در این مرحله یک شبکه دندریتی متشکل از فاز α به عنوان هسته‌ی دندریت‌ها است که توسط فاز β پریتکتیکی با ساختار سلولی احاطه شده است.

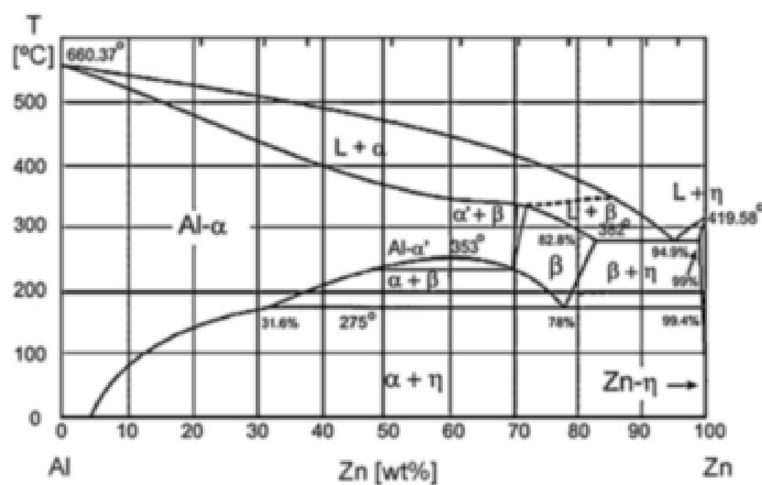
در ادامه سرمایش با وقوع استحاله‌ی یوتکتوئید فاز β پریتکتیکی به فازهای α و η تجزیه می‌شود. آنالیز ترکیب شیمیایی منطقه مذکور (نقطه B در شکل (۵- الف)) نشان‌دهنده حضور درصد بالای آلومینیم است، البته میزان آلومینیم نسبت به مرکز دندریت‌ها کاهش یافته است (شکل ۷- ب). در مناطق بین دندریتی نیز محصولات لایه‌ای حاصل از استحاله یوتکتوئیدی به صورت مشخص دیده می‌شود. آنالیز ترکیب شیمیایی منطقه بین دندریتی (نقطه C در شکل ۵- الف) وجود فاز η غنی از روی را تأیید می‌کند (شکل ۷- ج).

بررسی تصاویر میکروسکوپی و آنالیز ترکیب شیمیایی (شکل ۷- د، ه) حاکی از آن است که افزودن ۱ درصد وزنی مس نیز منجر به تغییرات فازی در آلیاژ نشده و به صورت محلول در فازهای غنی از آلومینیم و روی در می‌آید. اما مقادیر بیش از ۱ درصد وزنی باعث ترسیب فاز $CuZn_4$–□ در ساختار می‌شود. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد مس در مقادیر کم (حدود ۱ درصد وزنی) بصورت محلول جامد بوده در حالیکه در مقادیر بالا به دلیل عدم امکان انحلال در مذاب طی یک استحاله‌ی یوتکتیک بصورت فاز □ در ساختار رسوب می‌کند. به عبارت دیگر درصدهای بالای مس باعث

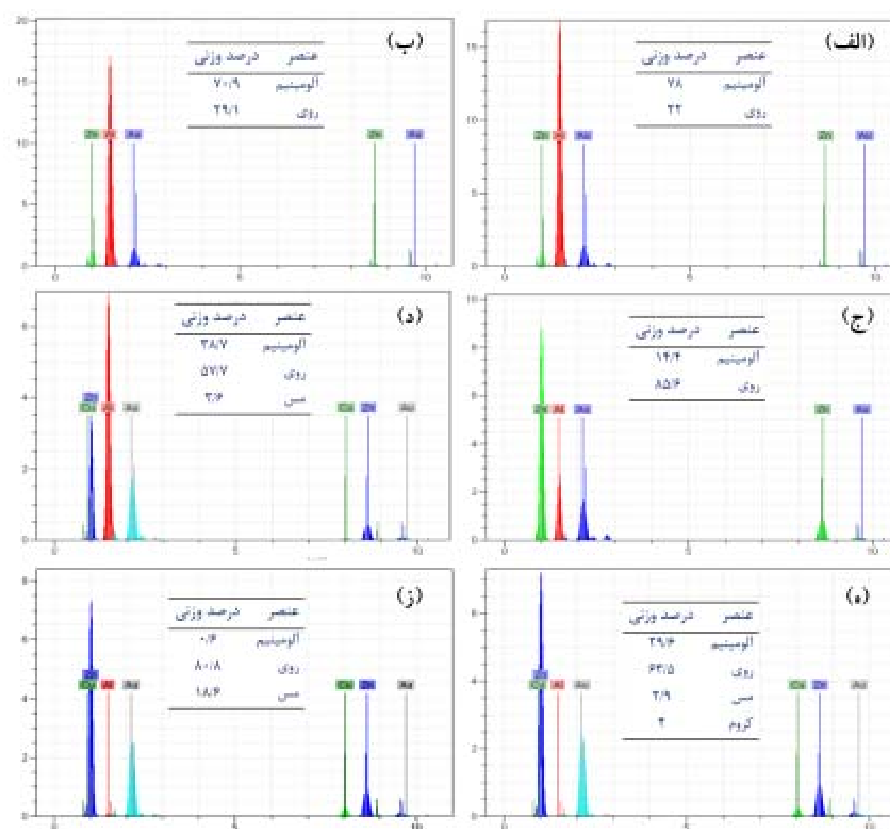
جابجایی ترکیب به ناحیه‌ای در دیاگرام فازی سه تایی روی- آلومینیم- مس [۱۸] (شکل ۸) می‌شود که مذاب غنی شده از مس طی یک استحاله یوتکتیک موجب تشکیل فاز ε در مقیاس بزرگ می‌شود [۵، ۱۹].



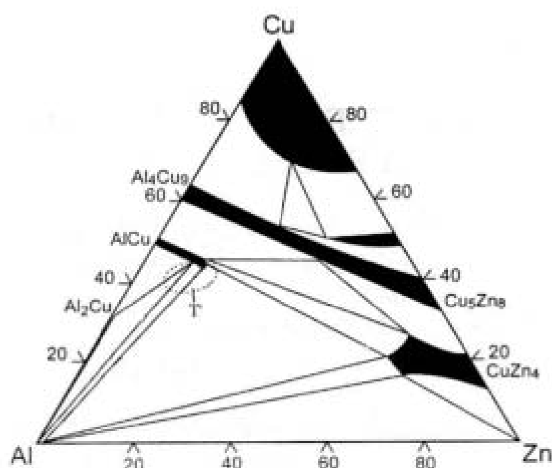
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژهای الف) بدون مس؛ ب) ۱ درصد وزنی مس؛ ج) درصد وزنی مس؛ د) ٤ درصد وزنی مس در فاصله ۲۰ میلی‌متری از مبرد



شکل ٦ دیاگرام فازی دوتایی روی- آلومینیم [۱۷]



شکل ۷ نتایج آنالیز EDS نقاط مشخص شده در شکل۵: الف) نقطهٔ A؛ ب) نقطهٔ B؛ ج) نقطهٔ C؛ د) نقطهٔ D؛ ه) نقطهٔ E؛ ز) نقطهٔ F

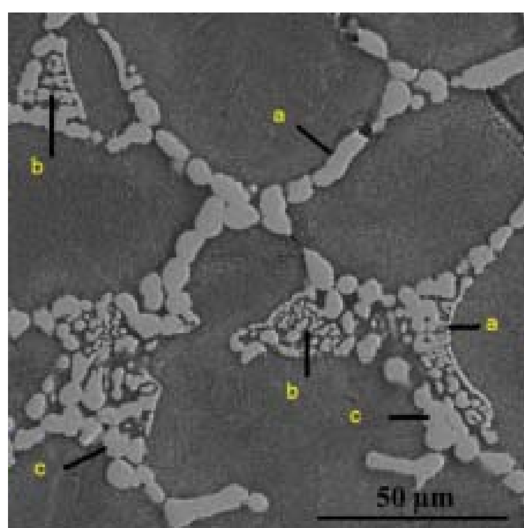


شکل ۸ مقطع همدمای دیاگرام فازی سه تایی روی- آلومینیوم- مس در دمای اتاق [۱۸]

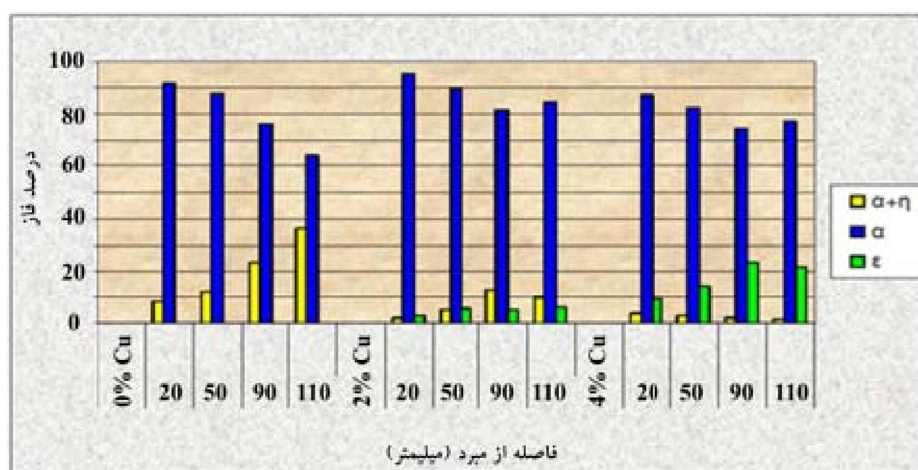
بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد رسوبات ε بصورت نوارهای باریک در لبه دندریت‌ها تشکیل می‌شوند. کاهش نرخ سرمایش و افزایش درصد وزنی مس باعث تغییر مرفولوژی رسوبات به‌صورت کشیده و انگشتی مانند می‌شود. با ادامه این روند رسوبات بتدریج کروی شده و از نوار قبلی جدا می‌شوند. در نواحی دور

از مبرد که فاصله زمانی انجماد بیشتر است، تغییرات مرفولوژی بطور کامل رخ می‌دهد. در شکل (۹) تغییرات مرفولوژی این رسوبات در آلیاژ حاوی ٤ درصد وزنی مس و در فاصله ۱۱۰ میلی‌متری از مبرد نشان داده شده است.

به منظور مقایسهٔ کمی تأثیر نرخ سرمایش و درصد وزنی مس بر فازهای تشکیل شده در حین انجماد، در شکل (۱۰) درصد فازهای مختلف در آلیاژهای حاوی ۰، ۲ و ٤ درصد وزنی مس در فواصل مختلف از مبرد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با دور شدن از مبرد و کاهش نرخ سرمایش با افزایش فضای بین دندریتی، فازهای متعلق به این نواحی نیز افزایش یافته است.



شکل ۹ تغییرات مرفولوژی رسوبات ε در آلیاژ حاوی ٤ درصد وزنی مس و در فاصله ۱۱۰ میلیمتری از مبرد: (a) رسوبات نواری؛ (b) رسوبات انگشتی؛ (c) رسوبات کروی



شکل ۱۰ درصد فازهای مختلف در آلیاژهای حاوی ۰، ۲ و ٤ درصد وزنی مس در فواصل مختلف از مبرد

نتیجه‌گیری

۱- ریخته‌گری تبریدی در قالب ماسه‌ای با تغییر نرخ سرمایش در فواصل مختلف از مبرد باعث تغییرات ریزساختاری در طول قطعه می‌شود. بطوریکه با افزایش فاصله از مبرد (کاهش نرخ سرمایش) فاصله‌ی بازوهای دندریتی، درصد فازهای بین دندریتی و میزان خلل و فرج در ساختار افزایش یافته و بر عکس.

۲- ریزساختار نهایی آلیاژهای فاقد مس و حاوی ۱ درصد وزنی مس شامل فاز α غنی از آلومینیم احاطه شده توسط فاز β پریتکتیکی و فازهای یوتکتوئیدی $\alpha+\eta$ در نواحی بین دندریتی است. در حالیکه افزودن مقادیر بیش از ۱ درصد وزنی مس باعث ترسیب فاز $CuZn_4$–□ در نواحی بین دندریتی می‌شود.

۳- مرفولوژی رسوبات □ به نرخ سرمایش و درصد وزنی مس افزوده شده وابسته است. با کاهش نرخ سرمایش و افزایش در صد وزنی مس مرفولوژی این رسوبات از نواری شکل تا کروی تغییر می‌کند.

مراجع

1. Rosale H.J.D., Hirata V.M.L., Velazquez J.L.M., Munoz M.L.S., "Microstructure characterization of phase transformations in a Zn-22 wt% Al-2 wt% Cu alloy by XRD, SEM, TEM and FIM", *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 313, pp. 154-160, (2000).
2. Savaskan T., Aydiner A., "Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc–aluminium–silicon alloys", *Wear*, Vol. 257, pp. 377-388, (2004).
3. Savaskan T., Alemdag Y., "Effect of nickel additions on the mechanical and sliding wear properties of Al-40Zn-3Cu alloy", *Wear*, Vol. 268, pp. 565-570, (2010).
4. Savaskan T., Aydıner A., "Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc-aluminium-silicon alloys", *Wear*, Vol. 257, pp. 377-388, (2004).
5. Savaskan T., Turhal M.S., "Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys", *Materials Characterization*, Vol. 51, pp. 259-270, (2003).
6. Zhu Y.H., Lee W.B., "Tensile deformation and phase transformation of furnace-cooled Zn–Al based alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 293, pp. 95-101, (2000).
7. Mojaver R., Shahverdi H.R., "The relationship between the wear behavior and microstructure features in end-chill cast Zn-27%Al alloy", *Wear*, Vol. 268, pp. 605-611, (2010).
8. Turhal M.S., Savaskan T., "Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys", *Journal of Materials Science and Engineering A,* Vol. 38, pp. 2639-2646, (2003).
9. Givanildo A., Santos A., Garcia A., "Design of mechanical properties of a Zn27Al alloy based on microstructure dendritic array spacing", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 2425-2430, (2007).
10. Osorio W.R., Garcia A., "Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a

function of solidification conditions", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp. 103-111, (2002).

11. Osorio W.R., Garcia A., "Effect of dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al 9 Wt Pct Si and Zn 27 Wt Pct Al alloys", *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 37, pp. 2525-2538, (2006).
12. Gündüz M., Cadirli E., "Directional solidification of aluminum-copper alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 327, pp. 167-185, (2002).
13. Ares A.E., Schvezov C.E., "Influence of solidification thermal parameters on the columnar-to-equiaxed transition of Al-Zn and Zn-Al alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, pp. 1485-1499, (2007).
14. Jiefang W., Shuqing Y., Jingpei X., Zhongxia L., Jiwen L., Wenyan W., "Effect of cooling rate on the microstructure of ZA48 alloy", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.,* Vol. 25, pp. 811-813, (2010).
15. Caceres C.H., Davidson C.J., Griffiths J.R., Newton C.L., "Effects of solidification rate and ageing on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp. 344-355, (2002).
16. Flemings M.C., "Solidification processing", McGraw-Hill, USA, (1974).
17. ASM Handbook, "Alloy Phase Diagrams", Vol. 3, ASM International, USA, (1992).
18. Chen H., Xin X., Dong D.Y., Ren Y.P., Hao S.M., "Study on the stability of T' phase in the Al-Zn-Cu ternary system", *Acta Metallurgica Sinica*, Vol. 17, pp. 269-273, (2004).
19. Savaskan T., Hekimoglu A.P., Purcek G., "Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 45-50, (2004).